第十一章　恆星之死

11.1 紅矮星

- 紅矮星 (Red dwarf) 是較冷和暗淡的主序星，質量小於 0.4太陽質量，位於主星序的右下方。
  - 恆星內的氣體從核心至表面不斷混合，氫燃料與氦灰燼均勻分佈，沒有燃燒的氫外殼，不會形成巨星
  - 紅矮星的質量小，引力弱，溫度低，氫燃燒得十分緩慢，長時間停留在主序星階段
  - 核心的溫度太低，不足以燃燒氦。氫燃料耗盡後便慢慢收縮，體積縮小，但溫度上升，從赫羅圖的右方移向左方形成白矮星 (White dwarf)

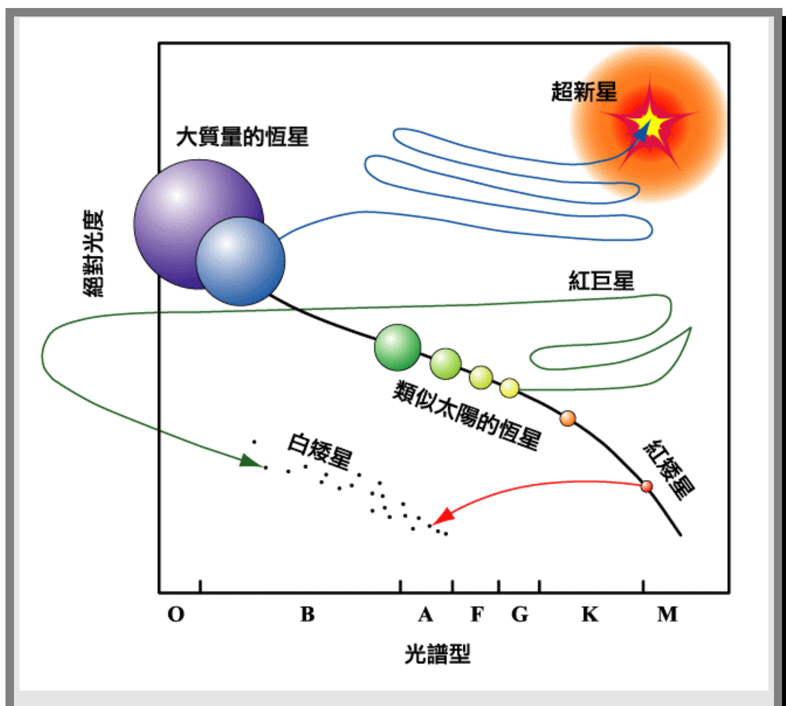


圖 11-1 這幅赫羅圖示意恆星死亡的三個主要方式。低質量的紅矮星壽命最長，它們最後變成白矮星；類似太陽的恆星會變成紅巨星，外層的物質散失後核心便壓縮成為白矮星。質量最大的恆星變成超紅巨星，最後更發生超新星爆炸。

11.2 類似太陽的恆星

- 0.4 太陽質量 < 恆星核心的質量 < 4 太陽質量。
  - 在紅巨星階段，恆星熾熱的核心足以把氦原子核聚合成碳原子核，進而再聚合成氧原子核，形成碳和氧層，但核心溫度不足以把碳和氧聚合成更重的元素
  - 核心外層的氫和氦燃燒時釋放大量能量，恆星進一步膨脹，並且失去大量能量
- 紅巨星表面引力較弱，燃料 (例如外層的氫) 突然燃點時放出大量能量，爆發把巨星的外層推出太空，形成行星狀星雲 (Planetary nebula)。
- 行星狀星雲
  - 星雲內有一個細小、高密度和熾熱的核心，其核反應熄滅，光度急促下降，成為表面溫度高但光度很低(因為體積太細小)的天體，移向赫羅圖的左下方，變成白矮星 (White dwarf)

- 雲星的氣體被熾熱星核釋放的紫外線電離，形成發射星雲 (Emission nebula)

• 行星狀星雲最終在太空中消散，其物質再形成下一代的恆星。
  - 現時地球上碳和氧等元素是太陽之前幾代恆星演化成紅巨星時製造的！

11.3 白矮星

• 主序星靠膨脹的氣體壓力抵消引力的收縮作用，得以平衡。

• 但核心的燃料耗盡後即停止製造熱能，使氣體壓力減弱
  - 引力戰勝氣體壓力，恆星的核心收縮
  - 核心變得越小，萬有引力變得越強 (反平方比律)，這又使核心收縮得越來越快，密度變得越來越高
  - 當密度到達約 10^6 g/cc 時，電子簡併壓力發揮作用，繼承氣體壓力對抗引力
  - 紅巨星的外層變成行星狀星雲後在太空中消散，核心則因電子簡併壓力對抗引力而得到平衡，形成白矮星

• 電子簡併壓力 (Electron degeneracy pressure)：當密度達到相當高時，電子被擠壓在一起，根據量子力學，電子在過度壓迫之下便會產生強大向外的壓力反抗

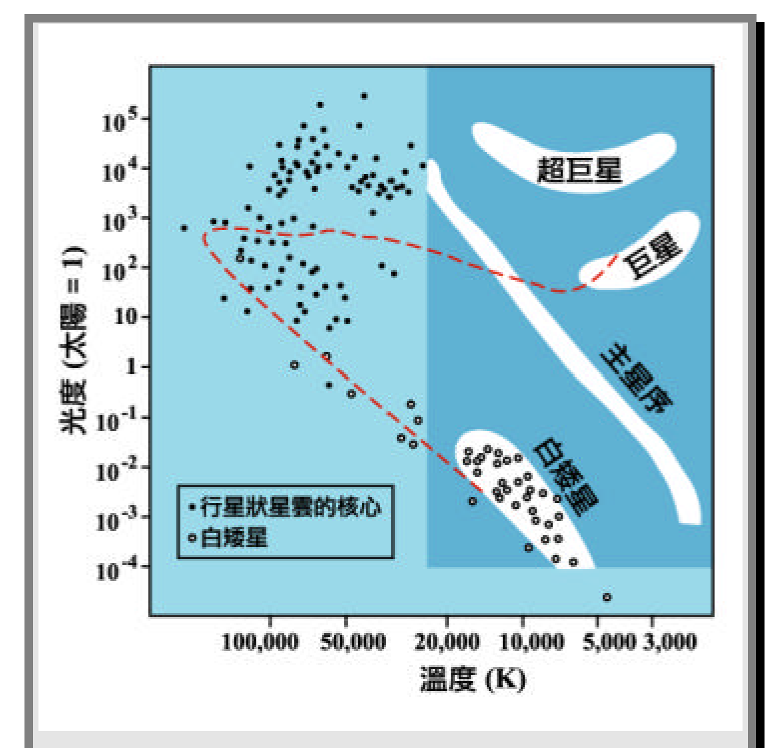


圖 11-2 我們只要把傳統赫羅圖的溫度範圍擴大，便可以顯示出恆星變成行星狀星雲後的演化路徑。行星狀星雲中心的恆星 (實心圓點) 比大部份白矮星更光和更熱。圖中的虛線顯示了一顆 0.8 太陽質量恆星演化成為白矮星的路徑。星雲中心的星核可能要在星雲消散後很久才會冷卻成白矮星。

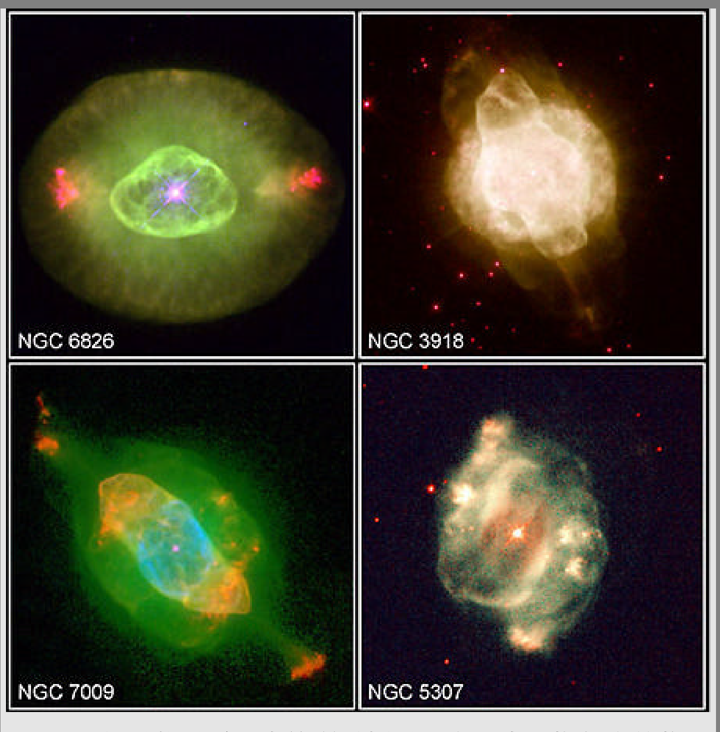


圖 11-3 行星狀星雲是中等質量恆星死亡時表面拋射來的物質，恆星的核心壓縮成為熾熱但暗淡的天體，最後更演化成白矮星。行星狀星雲的外貌千變萬化，很可能決定於恆星爆炸前的質量分佈。

- 白矮星的特性
  - 達至平衡態的熾熱、細小 (像地球般大小) 恆星，質量約與太陽相若，密度非常高 (一茶匙白矮星物質約重 15 噸)

    例如：天狼 B星：約 1 太陽質量，半徑為地球 0.76倍，表面溫度約 32,500 K，密度約為 3×10^6 g/cc
  - 表面引力強大，約為地球表面引力的十萬倍
  - 緩慢地輻射能量，百億年之後變得非常冰冷和暗淡，最後變成黑矮星 (Black dwarf)，寂靜地在太空中消失
  - 陳德拉錫加極限 (Chandrasekhar limit)：電子簡併壓力能夠承受的白矮星的最大質量。此極限為 1.4 太陽質量，超過這個極限後，簡併壓力再不能對抗引力，換言之，恆星將會進一步收縮，變成中子星或黑洞 (詳情見第十二及十三章)

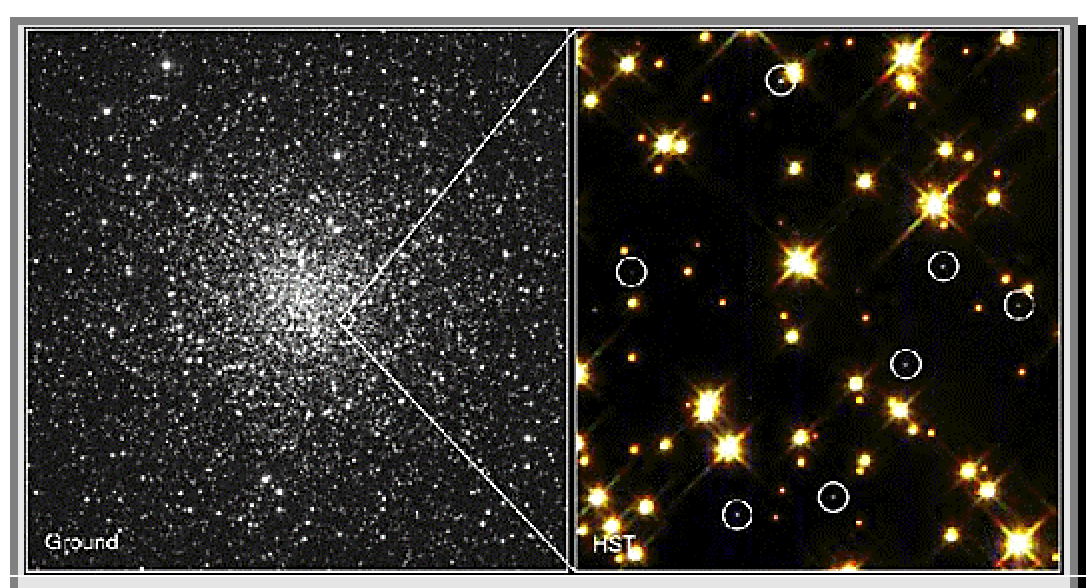


圖 11-4 左圖是用地面望遠鏡拍攝的球狀星團 M4，但在哈勃望遠鏡中 (右圖)，我們發現星團內存在很多暗淡恆星 (在白圈內的小點)，它們恆星演化末期形成的白矮星。因為球狀星團較年老，所以擁有很多白矮星。

11.4 超新星

- 恆星核心的質量 > 4 太陽質量
  - 繼續燃燒越來越重的元素直至鐵 (Iron) – 原子核束縛得最緊的元素
  - 超巨星的體積大約如木星公轉軌道般大小，但核心只比地球的體積大一些。包圍著鐵核心的同心層不斷進行核聚變，把燃料聚合成越來越重的元素，直至最後產生鐵為止，所以鐵核心不斷擴大，引力加強
  - 超巨星不能通過聚合鐵而產生能量，核心不能抵抗引力的收縮，迅速地塌縮，即使電子簡併壓力亦不能抗衡引力，核心收縮得越來越快，密度越來越高，當密度達至 10^{14} g/cc，核子 (原子核內的質子與中子) 被擠壓在一起，核子因而產生強大的反抗力，核心頓時變得非常堅硬

- 急速的塌縮撞落非常堅硬的核心，內部產生極強大的反彈，以衝擊波 (Shock wave) 向外傳播，並在外層觸發核反應，結果外層發生能量極高能量的爆炸 (相等於 10^{28} 噸 TNT)，使恆星的外層在極短時間內完全炸毀，形成超新星 (Supernova)

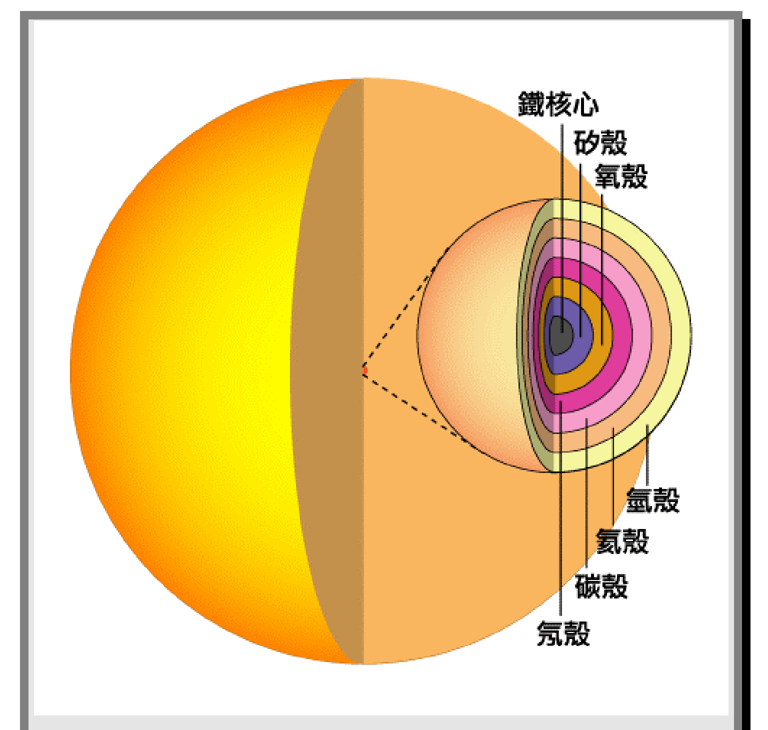


圖 11-5 大質量恆星接近演化晚期時的內部結構。圖左下角是一顆表面溫度很低的巨星，它的體積大約如木星公轉軌道般大小，但核心只比地球的體積大一些。包圍著鐵核心的同心層不斷進行核聚變，把燃料聚合成越來越重的元素，直至最後產生鐵為止，所以恆星的鐵核心不斷擴大。

- 超新星
  - 恆星的亮度突然增加很多個星等
  - 例如中國宋代天文學家於 1054 AD 記錄位於金牛座的「客星」，肉眼於日間也能看見，一個月後才漸漸變暗，兩年後才完全消失
- 超新星在高能的爆發中，聚合出比鐵更重的元素，包括金、水銀、甚至原子彈中的鈾等等。
  - 爆炸把星體的物質歸還太空，衝擊波促使下一代的恆星誕生
  - 我們相信，地球上的重金屬是太陽之前幾代恆星演化成超新星時製造的！
- 超新星爆炸後剩下星雲殘骸。
  - 例如蟹狀星雲 M1 是 1054 年超新星剩下來的殘骸
- 爆炸後可能仍保留著一個極細小、密度極高、由中子物質構成的核心，稱為中子星 (Neutron star) 。

11.5 雙星之演化

- 雙星 (Binary stars)：兩顆恆星在彼此的引力下繞對方旋轉。
- 宇宙間最少超過一半的恆星屬於雙星系統的成員。
- 當密近雙星系統 (Close binary system) 其中一個成員膨脹成紅巨星時，由於紅巨星的表面引力較弱，其鬆散的外層物質可能被其伴星 (Companion) 吸走，使兩顆恆星的命運改變
- 大陵五佯謬 (Algol paradox) (以著名的變星英仙座大陵五命名)：某些雙星系統內質量較低的恆星已經變了紅巨星，但質量較高的恆星仍然是主序星。

- 恆星演化理論說大質量的恆星壽命較短，這是否和上述觀測有矛盾？
- 解釋：質量較高的恆星首先離開主星序，膨脹成為巨星，並受伴星的引力影響，溢出外層物質，最後質量反而變得較小。因此伴星的質量相對地變得較高，但仍然停留在主星序上

- 如果兩顆恆星成員都膨脹為巨星，它們最後可能融合在一起，變成一顆急促自旋的超巨星。
- 如果其中一顆恆星演化為白矮星 (或其他類型的致密天體)，它可能吸引伴星的物質，形成吸積盤 (Accretion disk) – 圍繞著致密天體的漩渦狀結構。
  - 吸積盤在摩擦力與潮汐力的作用下變得非常熾熱 (可達數百萬度)
  - 釋放高能輻射 (例如紫外線或 X-射線)

圖 11-6 密近雙星系統的演化。(a) 右邊恆星的質量較高，(b) 很快便演化為巨星，其外物質量被伴星吸走，伴星的質量可能反而變得較高，但仍然停留在主星序上。(c) 紅巨星死亡時爆發。(d) 紅巨星死亡後演化為致密天體 (例如白矮星)，(e) 伴星的外層質量被這天體吸走，(f) 及後亦演化為巨星。

- 白矮星吸積盤內部的物質變得越來越熱，引發核聚變
  - 突然的爆炸吹掉白矮星的表面，外殼膨脹，光度突然增加新星 (Nova)
  - 當外殼不斷膨脹，溫度便漸漸下降，恆星又會變回從前般暗淡
  - 繼後可能再次恢復物量的轉移，重複整個過程，並再次發生類似的爆炸，變成再發新星 (Recurrent nova) 或光度隨時間不規則地改變的不規則變星 (Irregular variable)

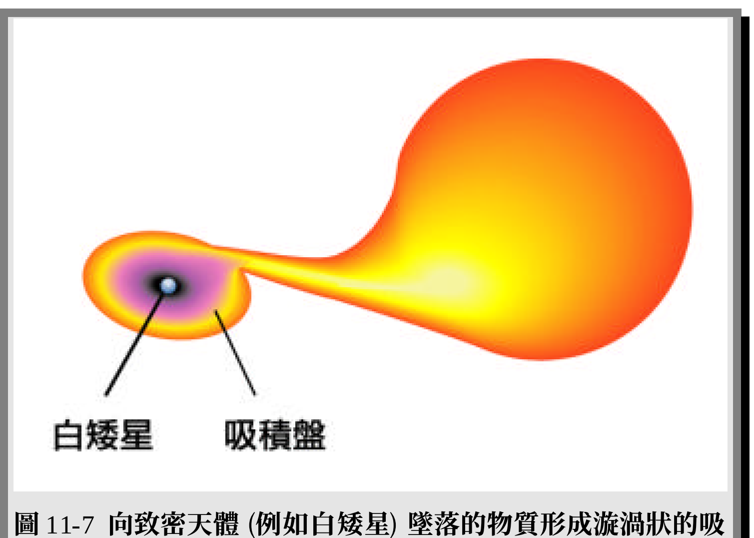


圖 11-7 向致密天體 (例如白矮星) 墜落的物質形成漩渦狀的吸積盤，吸積盤在摩擦力與潮汐力的作用下變得非常熾熱。